

УДК 620.172

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ И РЕЖИМОВ ИХ ПОСТОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКЦИИ АДДИТИВНОГО СИНТЕЗА

Т. А. ПРОТАСЕНЯ¹, А. П. КРЕНЬ¹, Г. А. ЛАНЦМАН¹, Г. Н. ДЬЯКОВА²

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси

²Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

UDC 620.172

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF 3D-PRINTING PARAMETERS OF POLYMER PRODUCTS AND THEIR POST-PROCESSING MODES ON THE PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTS

T. A. PRATASENIA, A. P. KREN, G. A. LANTSMAN, H. N. DYAKOVA

Аннотация. Рассмотрено влияние параметров 3D-печати изделий аддитивного производства по FDM-технологии и режимов постобработки изделий SLA-печати на их физико-механические характеристики. Установлено, что зависимости изменения модуля упругости E и предела прочности σ материала от температуры, скорости и толщины слоя при FDM-печати, а также режимов доотверждения образцов SLA-печати (времени выдержки и мощности УФ-излучения), могут быть представлены в виде трехмерных поверхностей и с достаточной для инженерных расчетов точностью описаны аналитическими уравнениями, позволяющими прогнозировать свойства изготавливаемых изделий, либо подобрать необходимый режим печати и постобработки для получения материала с требуемым набором эксплуатационных характеристик. Полученные результаты являются основой для развития методов неразрушающего контроля продукции аддитивного производства и расширения области применения метода динамического индентирования для контроля полимерных изделий, полученных по FDM- и SLA-технологиям.

Ключевые слова: аддитивные технологии, модуль упругости, предел прочности, постобработка, неразрушающий контроль.

Abstract. The influence of 3D-printing parameters of additive manufacturing products using FDM technology and post-processing modes of SLA-printed products on their physical and mechanical characteristics is considered. It has been established that the dependences of the change in the elastic modulus and tensile strength of the material on temperature, speed and layer thickness during FDM printing, as well as the modes of post-curing of SLA-printed samples (exposure time and UV radiation power) can be represented as three-dimensional surfaces and with sufficient for engineering calculations, the accuracy is described by analytical equations that make it possible to predict the properties of manufactured products, or to select the necessary printing and post-processing mode to obtain a material with the required set of performance characteristics. The results obtained are the basis for the development of methods for non-destructive testing of additive manufacturing products and for expanding the scope of the dynamic indentation method for testing polymer products obtained using FDM and SLA technologies.

Keywords: additive technologies, modulus of elasticity, tensile strength, post-processing, non-destructive testing.

Развитие современных технологий производства сложных и ответственных изделий машиностроения, авиационной, атомной и медицинской промышленности неразрывно связано с широким внедрением технологий 3D-печати (аддитивного синтеза). Однако для технологий послойного выращивания изделий характерна сильная зависимость их физико-механических свойств от заданных параметров печати и последующих условий протекания реакций модификации структуры материала, т. е. режимов постобработки.

Как правило, нестабильность заданных условий изготовления изделия приводит к неравномерному распределению свойств внутри его слоев. Например, материал, получающий более высокую дозу облучения при лазерной стереолитографии (SLA-технология), либо имеющий более высокую температуру на выходе из сопла экструдера при послойном наплавлении (FDM-технология), демонстрирует и более высокую плотность сшивки, что приводит к неравномерной межслоевой адгезии и, как следствие, к пространственному изменению физико-механических характеристик материала и возникновению внутренних напряжений. На макроуровне все это может быть дифференцировано как анизотропия свойств полимерного материала, которая в той или иной степени может изменяться не только от условий и параметров печати, но и от геометрии создаваемого изделия, и даже от его расположения на столе 3D-принтера.

Улучшить характеристики изделий, полученных путем аддитивных технологий, удастся различными способами постобработки (УФ-излучение, отжиг), что на первый взгляд решает вопрос улучшения свойств материала, но также может привести к неравномерной деградации внешних слоев изделия.

В настоящее время физико-механические свойства изделий аддитивного синтеза определяются исключительно в ходе стандартных разрушающих испытаний с обязательным изготовлением образцов-свидетелей по тем же технологиям и режимам печати, что и основное изделие. Это приводит к излишним временным и материальным затратам, и при этом не гарантирует, что установленные свойства материала образцов идентичны физико-механическим характеристикам готового изделия. Кроме того, вариативность задания параметров печати и способов создания изделия (даже в рамках одной технологии производства) определяет необходимость в оперативном безобразцовом контроле свойств, позволяющем в режиме реального времени корректировать параметры печати и адаптировать готовое изделие под требования заказчика. Поэтому вопросам разработки и развития методов неразрушающего контроля, способных дать численную оценку физико-механическим характеристикам материалов изделий аддитивного синтеза, в настоящее время во всем мире уделяется первостепенное внимание.

Целью данного этапа исследования являлся анализ влияния различных параметров 3D-печати и режимов постобработки на модуль упругости E и предел прочности σ изделий аддитивного синтеза, полученных по SLA-технологии из фотополимерной смолы Formlabs Clear Resin V4 (Formlabs Inc., США) и методами FDM-печати из полиамида Fiberforce Carbon Fiber (Fiberforce, Италия). При этом действительные значения указанных физико-механических характеристик

образцов предложено оценивать посредством стандартных испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ 34370–2017 [1]. Полученные результаты будут являться основой для адаптации одного из современных и наиболее интенсивно развивающихся в настоящее время методов неразрушающего контроля – динамического индентирования для оценки физико-механических характеристик полимерных изделий аддитивного производства и позволят разработать методики неразрушающего оперативного контроля их прочностных и упругих свойств [2].

Изготовление образцов для проведения исследования проводилось в Белорусском государственном технологическом университете (г. Минск) в соответствии с требованиями [1]. Печать изделий по FDM-технологии осуществлялась на 3D-принтере «Sharebot» (Sharebot, Италия) с послойной укладкой филамента при печати под углом $\pm 45^\circ$ относительно оси образца и 100-процентным заполнением шаблона. Изменению подлежали следующие параметры печати: скорость печати v (55, 70 и 85 мм/с), толщина слоя h (от 0,1; 0,2 и 0,3 мм) и температура печати T (240 °С, 255 °С и 270 °С).

Выращивание образцов по SLA-технологии проводилось на 3D-принтере Form2 (Formlabs Inc., США), при этом мощность лазера составляла 250 мВт, размер пятна лазера – 140 мкм, температура смолы – 31 °С. Доотверждение образцов проводилось под действием УФ-излучения мощностью W , равной 36, 39 и 48 Вт, на протяжении времени t от 15 до 60 мин.

Таким образом, на предварительном этапе исследования было подготовлено 35 образцов, изготовленных по FDM-технологии (по пять образцов для каждого сочетания изменяемых параметров печати), и 25 образцов, изготовленных по SLA-технологии. Все образцы были испытаны на растяжение на универсальной испытательной машине MTS Criterion 43 с непрерывной скоростью нагружения 10 мм/мин при температуре воздуха (20 ± 2) °С и относительной влажности воздуха (70 ± 5) %. Результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2.

Приняв неизменным один из параметров выращивания изделия по FDM-технологии (скорость, температуру или толщину слоя печати), полученные результаты могут быть представлены в виде поверхности, т. е. зависимости изменения модуля упругости E или предела прочности σ от тех или иных параметров печати. Ниже приведены примеры подобных зависимостей при фиксированной температуре печати 255 °С (рис. 1) и толщине слоя 0,2 мм (рис. 2).

Аналогичным образом могут быть получены зависимости изменения физико-механических характеристик полимерных изделий, выращенных по SLA-технологии (рис. 3).

При этом представленные зависимости достаточно точно (с коэффициентом корреляции не ниже 0,99) могут быть описаны аналитическими уравнениями, общий вид которых и возможные коэффициенты также приведены на рис. 1–3. Основным преимуществом полученных зависимостей является возможность прогнозировать физико-механические свойства полимерных изделий аддитивного синтеза в зависимости от заданных параметров 3D-печати, либо целе-

направленно подбирать параметры печати для получения материала с требуемым набором эксплуатационных характеристик.

Табл. 1. Результаты испытаний на растяжение образцов, изготовленных по FDM-технологии

Фиксируемый параметр печати	Вариативный параметр печати	Статистический показатель	E , ГПа	σ , МПа
$v = 70$ мм/с, $T = 255$ °С	$h = 0,1$ мм	Среднее по пяти образцам	1,81	45,73
		Коэффициент вариации, %	3,22	2,52
	$h = 0,2$ мм	Среднее по пяти образцам	1,66	39,81
		Коэффициент вариации, %	9,81	1,92
	$h = 0,3$ мм	Среднее по пяти образцам	1,30	39,75
		Коэффициент вариации, %	1,46	1,37
$h = 0,2$ мм, $T = 255$ °С	$v = 55$ мм/с	Среднее по пяти образцам	1,73	41,20
		Коэффициент вариации, %	2,60	3,39
	$v = 85$ мм/с	Среднее по пяти образцам	1,66	39,83
		Коэффициент вариации, %	1,81	0,91
$v = 70$ мм/с, $h = 0,2$ мм	$T = 240$ °С	Среднее по пяти образцам	1,04	36,63
		Коэффициент вариации, %	4,02	2,04
	$T = 270$ °С	Среднее по пяти образцам	40,25	1,25
		Коэффициент вариации, %	2,18	2,19

Табл. 2. Результаты испытаний на растяжение образцов, изготовленных по SLA-технологии

t , мин	Статистический показатель	$W = 36$ Вт		$W = 39$ Вт		$W = 48$ Вт	
		E , ГПа	σ , МПа	E , ГПа	σ , МПа	E , ГПа	σ , МПа
15	Среднее по пяти образцам	–	–	1,66	29,02	–	–
	Коэффициент вариации, %	–	–	4,01	6,08	–	–
30	Среднее по пяти образцам	–	–	2,10	29,87	–	–
	Коэффициент вариации, %	–	–	5,11	3,95	–	–
60	Среднее по пяти образцам	2,35	28,37	2,40	34,99	2,11	34,54
	Коэффициент вариации, %	1,27	8,20	5,49	6,95	11,79	1,34

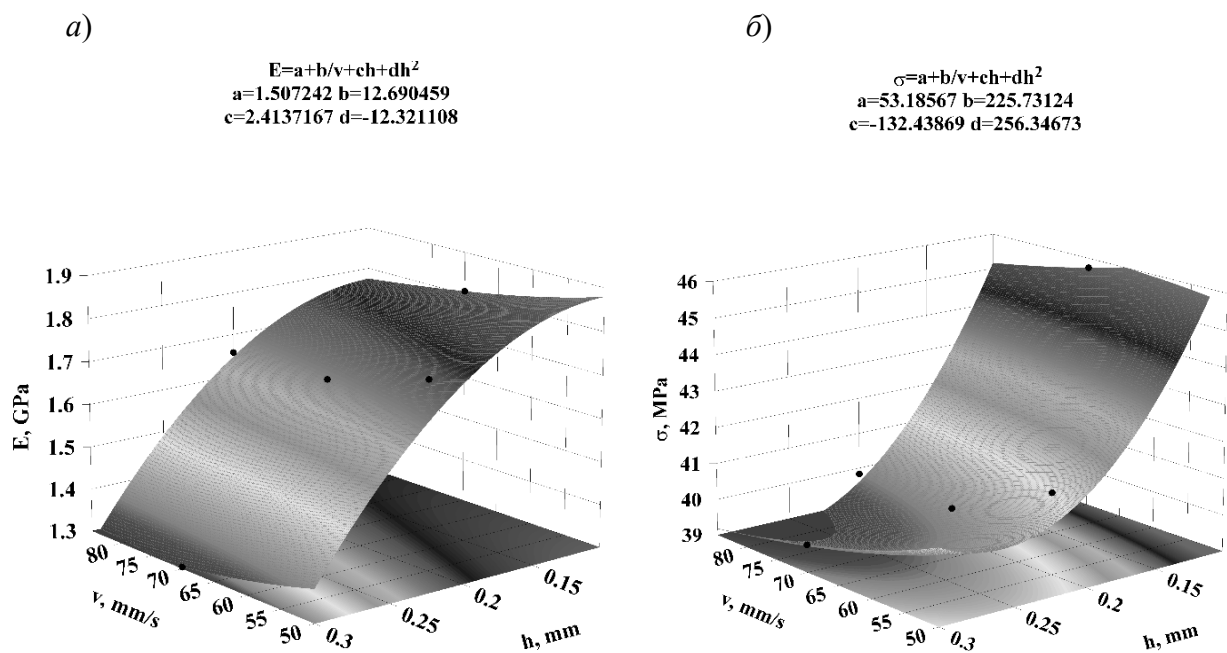


Рис. 1. Зависимость изменения модуля упругости E (a) и предела прочности σ (б) полимерного материала от скорости и толщины слоя FDM-печати при температуре 255 °C

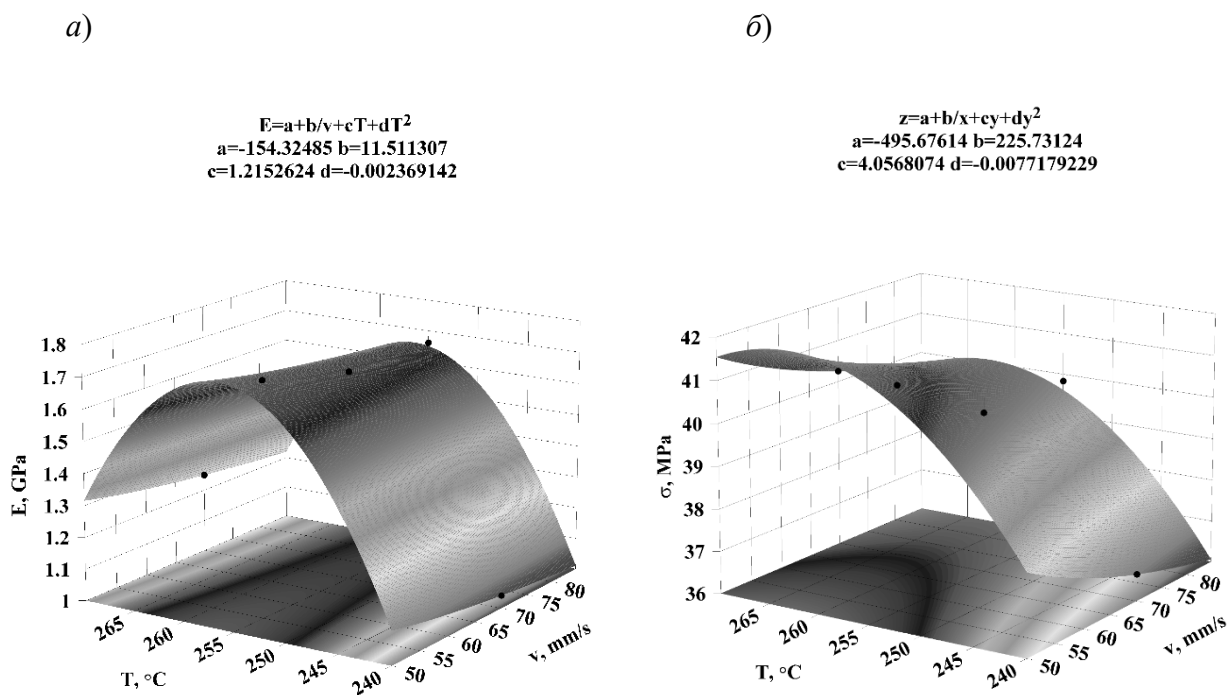


Рис. 2. Зависимость изменения модуля упругости E (a) и предела прочности σ (б) полимерного материала от скорости и температуры FDM-печати при толщине слоя 0,2 мм

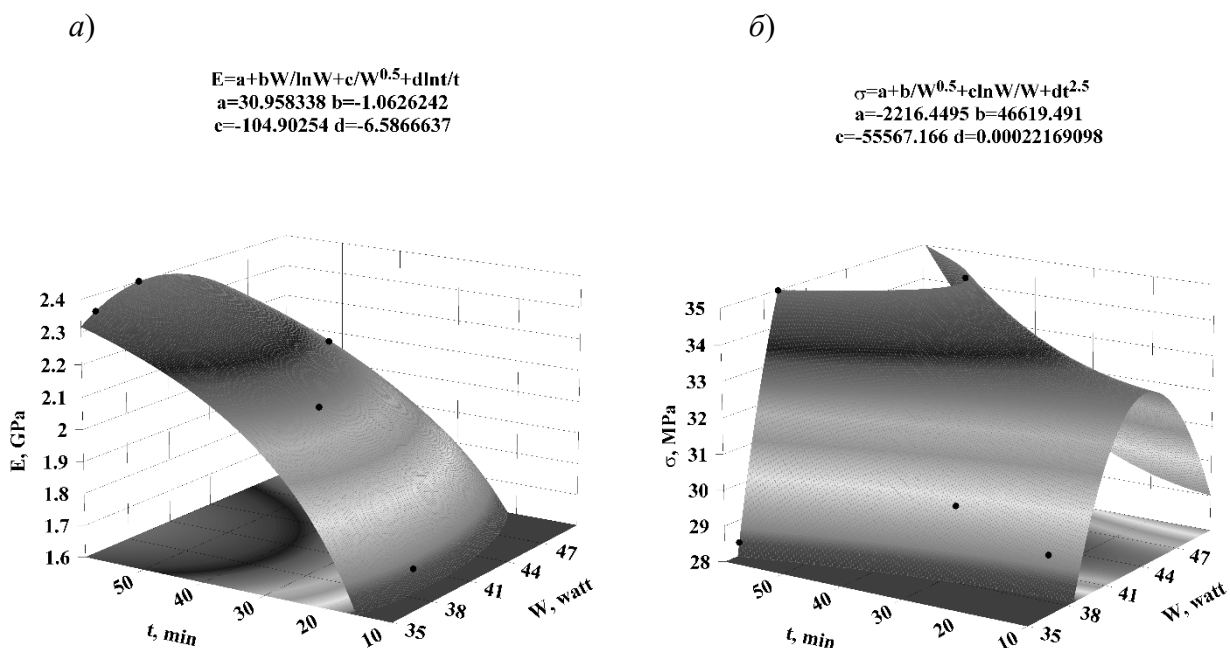


Рис. 3. Зависимость изменения модуля упругости E (a) и предела прочности σ (б) полимерного материала от мощности УФ-излучения и времени выдержки при постобработке изделий, полученных по SLA-технологии

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: проект № T22M-004 «Развитие метода локального контактного деформирования для неразрушающего контроля полимерных изделий, полученных путем аддитивного синтеза».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 34370–2017. Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Ч. 1: Общие принципы. – Введ. 01.12.2018. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 26 с.
2. The mechanical response characteristics of sapphire under dynamic and quasi-static indentation loading / L. Xiaosheng [et al.] // Ceramics International. – 2018. – Vol. 44, iss.13. – P. 15208–15218.

E-mail: 5657397@gmail.com, 7623300@gmail.com, kravhchn@gmail.com.